Ueber den

Einfluss der Torsion auf die absolute Festigkeit der Metalldrähte.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doctorwürde

bei

hochlöblicher philosophischer Facultät zu Marburg

eingereicht

von

Valentin Kramm,

O. Lehrer a. d. Realschule I. Ordnung zu Cassel.

Mit einer Figurentafel.

Marburg, 1873.

Druck von Friedr. Scheel in Cassel.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554412_0119

Ueber den

Einfluss der Torsion auf die absolute Festigkeit der Metalldrähte.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doctorwürde

bei

hochlöblicher philosophischer Facultät zu Marburg

eingereicht

von

Valentin Kramm,

O. Lehrer a. d. Realschule I. Ordnung zu Cassel.

Mit einer Figurentafel.

Marburg, 1873.

Druck von Friedr. Scheel in Cassel.

Einleitung.

Je nach der Art und Weise, auf welche Kräfte einen festen Körper derart angreifen, dass der Zusammenhang seiner Moleküle aufgelöst wird, heisst der Widerstand, welchen der Körper dieser zerreissenden Kraft entgegensetzt:

absolute Festigkeit,
rückwirkende Festigkeit,
relative Festigkeit,
Torsions-Festigkeit.

Während es an Experimental-Untersuchungen über Torsionsfestigkeit fast ganz zu fehlen scheint, sind über relative und rückwirkende Festigkeit einige wenige, namentlich über Baumaterialien, über absolute Festigkeit aber zahlreiche Versuche angestellt worden. Die zu den letzteren verwandten Körper waren indessen meist solche, welche sich auch am besten und leichtesten zu Versuchen über Elasticität eigen, es waren stab- und drahtförmige Körper, besonders Metalldrähte. Von den über die absolute Festigkeit der Metalldrähte angestellten Versuchen möge hier eine kurze Uebersicht folgen, indem dieselbe den von uns angestellten und weiter unten zu beschreibende am nächsten stehen.

Die absolute Festigkeit der Metalldrähte.

Versuche über die absolute Festigkeit von Eisendrähten wurden schon von Musschenbroek, Guyton de Morveau und anderen angestellt. Seit der Construction der Drahtbrücken, gewannen dieselben an Interesse und Wichtigkeit, wie denn auch die Pariser Academie eine Commission zur Anstellung solcher Versuche ernannte. Es ergab sich hierbei die Festigkeit der Eisendrähte, für das Quadratmillimeter als Querschnitt berechnet gleich 60 Kilo, die dünner Klaviersaiten gleich 80 Kilo. Indessen zeigten diese Resultate mit den später von Séquin und Dufour gefundenen Werthen wenig Uebereinstimmung, welcher Umstand in der äusserst verschiedenen Beschaffenheit der Drähte, welche dieselben je nach der Behandlungsweise vor und nach dem Ziehen annehmen, als auch darin seinen Grund hat, dass die Versuche nicht zahlreich genug angestellt worden waren. Aus den von Dufour angestellten Versuchen ergab sich aber schon, wenn die Festigkeiten verschiedener Drähte nach dem Satze: dass dieselben im Verhältnisse zu den Querschnitten stehen, auf die Einheit des Querschnitts reducirt wurden, dass man um so grössere Zahlen erhielt, je dünner die zu den Versuchen verwandten Drähte waren, wie aus der folgenden Tabelle ersichtlich ist.

Dicke	Festigkeit in Kilo.	Wiener Pfund auf 1 Wiener Q.-Zoll.
0,85	35,5	84026
1,9	178	77748
2,7	349	72747
3,7	644	74174

Baudrimont, welcher die Veränderungen in der Dichtigkeit und Zähigkeit verschiedener Metalle beim Drahtziehen und Walzen untersuchte, stellte fest, dass die zu feinen Drähten gezogenen Metalle eine grössere Dichtigkeit besitzen, als man ihnen durch irgend ein anderes Verfahren

zu ertheilen im Stande ist und ferner: dass durch das Ausglühen die Zähigkeit der Drähte bedeutend vermindert wird.

In neuerer Zeit befasste sich mit demselben Probleme der Festigkeit der Metalldrähte besonders Wertheim und legte derselbe die Resultate seiner Untersuchungen in der berühmten Abhandlung: „Von der Elasticität und Cohäsion der Metalle" Pogg. Ann. Band LVII. und Ergänzungsband II. nieder.

Die zu den Versuchen verwandten Drähte hatten einen Durchmesser von 3, 5, 10 Mm. Die Gewichte, welche das Zerreissen bewirkten, wurden bestimmt, erstens, indem man den Stab sich langsam ausdehnen liess, zweitens, indem die Gewichte rasch bis zum Zerreissen des Drahtes vergrössert wurden, in beiden Fällen an ausgezogenen und angelassenen Drähten. Für einige Metalle seien die Werthe hier beigefügt; die Zahlen bedeuten Kilogramme, welche das Zerreissen bewirken und zwar auf das Quadratmillimeter als Querschnitt reducirt:

		langsam	plötzlich
Kupfer	ausgezogen	40,30	41,00
„	angelassen	30,54	31,55
Eisen	ausgezogen	61,10	62,5
„	angelassen	46,88	50,25
Stahldraht	ausgezogen	70,00	85,9
„	angelassen	40,00	53,9

Es ergeben sich hierbei folgende Sätze:

1) Die Werthe für die Cohäsion werden um so kleiner gefunden, je langsamer man die Belastung vermehrt.
2) Das Anlassen verringert den Widerstand beim Zerreissen bedeutend.

Bei weitem die wichtigsten und umfassendsten hierher gehörigen Untersuchungen aber wurden von Karmarsch angestellt, deren Resultate in zwei Abhandlungen:

1) „Versuche über die absolute Festigkeit der zu Draht gezogenen Metalle" (Jahrbücher d. polytech. Institut zu Wien, Bd. 18) und

2) „Ueber die absolute Festigkeit der Metalldrähte“ (Mittheilungen des Hannov. Gewerbevereins 1859) mitgetheilt sind und welche diesen Gegenstand zu einem befriedigenden Abschlusse gebracht haben.

In der ersten der erwähnten Arbeiten wurden Drähte von den wichtigsten Metallen und ihren Legirungen; zugleich aber auch Drähte von sehr verschiedenen Durchmessern untersucht.

So kamen z. B. von Eisendraht 13 Sorten und zwar von 0,0098 bis 0,0361 Pariser Zoll Dicke zur Verwendung. Mit einem jeden wurden 6 Versuche angestellt und neben die sich ergebenden Mittel wurde die Anzahl der Pfunde gesetzt, bei welchen die einzelnen Drähte zerreissen müssten, wenn die Festigkeit des Eisens in den feinen Drähten verhältnissmässig dieselbe wäre wie bei den dickeren, d. h. wenn die zerreissenden Gewichte im Verhältnisse des Querschnittes stünden. Die Zahlen der zweiten Reihe zeigten sich aber um so kleiner im Vergleich zu denen der ersten je dünner die Drähte waren. Ferner wurden geglühte Drähte untersucht und die sich ergebenden Werthe mit denen der ungeglühten verglichen. Die Zunahme der Festigkeit zwischen je zwei Drähten verschiedener Dicke wurde mit n, die Zunahme der Festigkeit derselben Drähte in geglühtem Zustande aber mit b bezeichnet und $n-b=a$ gesetzt. Es ergab sich, dass dabei b immer nur den kleineren Theil von n ausmacht, während es bei zunehmender Feinheit relativ gegen a wächst.

Von den Versuchen, die mit den übrigen Metalldrähten angestellt wurden, wollen wir nur noch der auf den Stahldraht bezüglichen erwähnen.

Die Festigkeit des hartgezogenen Stahldrahtes verhält sich zu der des besten Eisendrahtes wie 107 : 100.

Mit dieser grossen absoluten Festigkeit steht die relative in gar keinem entsprechenden Verhältnisse; denn die hartgezogenen Stahldrähte sind so spröde, dass sie selbst bei schwachem Biegen schon entzwei brechen.

Die Zunahme der Festigkeit durch Ziehen ergab sich fast als dieselbe wie beim Eisendraht.

In der zweiten der oben erwähnten Abhandlungen wird von der Thatsache ausgegangen, dass sich die Festigkeit der Drähte steigert, wenn sie feiner gezogen werden. Es ist dies nach Karmarsch nicht anders zu erklären als in Folge einer an der Oberfläche eintretenden Verdichtung. Man kann daher die Festigkeit eines Drahtes als aus zwei Summanden bestehend ansehen, von welchen der eine mit dem Querschnitt, der andere mit dem Umfange desselben zusammenhängt und es lässt sich also die Festigkeit (F) eines Drahtes vom Durchmesser D ausdrücken durch die Gleichung:

$$F = aD^2 + bD.$$

Die beiden unbekannten Coefficienten a und b, welche also von dem Durchmesser resp. von der zweiten Potenz desselben abhängig sind, müssen aus der Erfahrung abgeleitet werden. Soll dies mit einiger Sicherheit geschehen, so muss man die Zerreissungsgewichte einer etwas grösseren Reihe von Drähten verschiedenen Durchmessers aus möglichst gleich beschaffenem Metall vor sich haben. Diese Zahl hat man alle paarweise ohne Wiederholung zu combiniren um so zu zwei Gleichungen zu gelangen von der Form:

$$F = aD^2 + bD$$
$$f = ad^2 + bd$$

in welchen also $F, f \ldots$ die durch den Versuch gefundenen Zerreissungsgewichte $D, d \ldots$ die Durchmesser sind. Durch Auflösung sämmtlicher Gleichungen erhält man ebensoviel Werthe für a und b als man Paare von Gleichungen gehabt hat. Diese Werthe weichen oft bedeutend von einander ab; jeder einzelne Werth ist richtig für die beiden betreffenden Drähte, aber nicht auch für alle anderen. Unter sämmtlichen Werthen sind nun die am meisten übereinstimmenden so auszuwählen, dass jeder Draht wenigstens einmal darin vorkommt; schliesslich ist hieraus das arithmetische Mittel zu nehmen. Sehr abweichende Werthe sind als aus einer

abnormen Beschaffenheit des Drahtes herrührend, wegzulassen. Zur besseren Veranschaulichung des Vorstehenden theilen wir eine Versuchsweise aus der angeführten Abhandlung mit.

Nr. des Drahtes.	Dicke in Mm.	Festigkeit in Pfund.
I.	1,242	152,7
II.	0,975	100,6
III.	0,767	70,7
IV.	0,629	49,0.

Es ergibt sich nun aus den Combinationen

	$a =$	$b =$
I und II :	74,04	30,98
I „ III :	64,78	42,49
I „ IV :	73,49	31,67
II „ III :	52,88	51,65
II „ IV :	73,07	31,94
III „ IV :	103,48	12,82.

Drei gut übereinstimmende Combinationen, in denen auch die 4 Drähte vorkommen, sind die 3 ersten. Das arithmetische Mittel aus denselben ist $a = 70{,}77$; $b = 35{,}05$.

Die Summe dieser beiden Conficienten ist die berechnete Festigkeit eines Drahtes von 1 Mm. Dicke.

Es wurde nun in einer grossen Reihe von Drähten die gefundene und berechnete Festigkeit neben einander gestellt und die Abweichung in Procenten berechnet. Dieselbe betrug von — 7 bis + 24 %.

Bei den grössten Abweichungen waren die Drähte entweder sehr schiefrig, spröde oder auffallend weich; bei besonders guten Drähten hingegen differirten die Resultate nur von — 5 bis + 8 Procent.

Ausgeglühte Kupferdrähte lassen den Conficienten b ganz verschwinden und steht bei ihnen die Festigkeit nur in dem Verhältnisse des Querschnitts. Das Endresultat der Untersuchung war folgendes:

Aus den Zerreissungsversuchen können die Coefficienten a und b so genau bestimmt werden,

dass mittelst derselben die Festigkeit eines Drahtes mit befriedigender Annäherung an die Erfahrungsresultate berechnet werden kann, was mittelst der bisher aufgestellten Festigkeitscoefficienten für ein Quadratmillimeter nicht möglich ist.

Es ergab sich für:

	nicht geglüht			geglüht		
	a	b	$a+b$	a	b	$a+b$
Stahldraht	100	42	142	90	6	96
eis. Klar. Saite .	100	36	136	68	10	78
bester Eisendraht	100	25	125	52	6	58
gewöhnl. „	72	36	108	45	10	55
Kupferdraht . . .	55	15	70	37	0	37

Der Coefficient a ist immer viel grösser als b; bei weichen Metallen wird $b = o$; durch Ausglühen verkleinern sich beide Coefficienten, jedoch ist die Verkleinerung stets grösser bei b.

Zwischen geglühten und ungeglühten Drähten derselben Art, aber verschiedener Dicke, besteht kein constantes Verhältniss; die Festigkeit nach dem Ausglühen ist ein um so grösserer Theil der Festigkeit vor dem Ausglühen, je dicker der Draht ist. Bei derselben Dicke von 1 Mm. erhält man als das Verhältniss der Festigkeiten vor und nach dem Glühen z. B.:

für Eisendraht 1 : 0,51
„ Stahldraht 1 : 0,68.

Auf diese von Karmarsch gewonnenen wichtigen Resultate möge noch besonders aus dem Grunde hingewiesen werden, weil derselben in den verbreitetsten Lehrbüchern der Physik bis jetzt gar keine Erwähnung geschieht, sondern einfach auch für Drähte die Festigkeit als direct proportional mit dem Querschnitt bezeichnet wird.

Es zeigt sich also hier wie auch in anderen Zweigen der Physik, dass theoretisch abgeleitete Gesetze auf specielle

Fälle angewendet zu ungenügenden Resultaten führen, wenn sie nicht zuvor die nöthigen Modificationen und Ergänzungen erfahren haben.

Specifizirung der Aufgabe.

Soweit aus der uns hier zu Gebote stehenden physikalischen Literatur zu ersehen war, sind bis jetzt fast keine Versuche über Torsionsfestigkeit angestellt worden. Auch Mousson und Wüllner bestätigen dies in ihren Lehrbüchern.

Ersterer sagt: „Es fehlt an Versuchen zur Bestimmung des Torsionscoefficienten, nur für Gusseisen ergeben sich Werthe von 17,2 bis 25,7."

Letzterer: „Ueber Drehfestigkeit ist nichts Genaueres bekannt geworden."

Es ist daher die Absicht der vorliegenden Arbeit, in dieser Hinsicht einige Beiträge zu liefern.

Ehe wir jedoch zu der Beschreibung der von uns angestellten Versuche übergehen, wollen wir noch einer von Mousson in seinem Lehrbuche pag. 233 aufgestellten Formel für die Torsionsfestigkeit erwähnen, nämlich

$$P.\,l = \varkappa'''.\,Q$$

wobei P. l das Moment der den Bruch bewirkenden Kraft, Q eine vom Querschnitt abhängige Grösse (für einen Kreis $= \frac{\pi}{2}.\,R^3$), $\varkappa'''$ den Coefficienten des Bruches durch Torsion vorstellt. Es ist diese Formel anwendbar bei eisernen Säulen, Balken und dergleichen; den unsrigen Versuchen konnte sie nicht zu Grunde gelegt werden, da bei denselben noch ein neues Moment, nämlich die spannenden Gewichte, welche während der Torsion wirkten, hinzugekommen ist.

Die hier niedergelegten Versuche wurden, wie schon angedeutet, mit Metalldrähten von 0,3 bis 0,8 Mm. Dicke angestellt und zwar wurden dieselben durch angehängte Gewichte belastet und hierauf bis zum Zerreissen tordirt

und es sind die sich darbietenden Fragen, deren Beantwortung wir versucht haben, folgende:

Wie hängt die Zahl der Torsionen, welche Zerreissen bewirkt, zusammen

a) mit dem spannenden Gewichte?
b) mit dem Stoff oder der absoluten Festigkeit?
c) mit der Länge des Drahtes?
d) mit der Dicke desselben?

Endlich werden noch einige bei den Versuchen auftretende Erscheinungen besprochen werden und zwar:

a) die Schraubenwindungen auf der Oberfläche, ferner die Verlängerung und Verkürzung des Drahtes bei der Torsion.
b) Knickungsfiguren beim Zerreissen desselben.

Beschreibung des Apparates und der Versuche.

Der Apparat, mit welchem wir unsere Versuche angestellt haben, bestand in Folgendem:

In die feste Mauer des Versuchslocales, eines Zimmers des physikalischen Laboratoriums des Herrn Professors Melde zu Marburg, war (siehe *Fig. 1*) ein starkes Kniestück A von Eisen eingelassen, welches bei a verbreitert und cylindrisch durchbohrt war. Etwas unterhalb desselben war ein zweites vorn durchbohrtes und mit Stellschrauben versehenes Eisenstück B in dieselbe Wand eingelassen und endlich in der Entfernung von ungefähr einem Meter unterhalb A ein zweimal rechtwinkelig umgebogenes Eisenstück C in die Mauer eingefügt, das an seinem Ende bei c ein cylindrisches Loch hatte. In diese Oeffnung passte ein kurzer, hohler, oben mit einem ringsum vorstehenden Absatze versehener Eisencylinder, an welchen das Zahnrad R fest angelöthet war, welches nun weiter durch das Zahnrad R_1 in Rotation versetzt werden konnte.

Durch die Oeffnung des hohlen mit *R* verbundenen Cylinders ging ein gut passender runder Eisenstab hindurch, der oben bei *F* mit einer Klemmvorrichtung für die einzuspannenden Drähte, unten mit einem Haken für die anzuhängenden Gewichte versehen war. Dieser Eisenstab hatte eine verticale Furche und konnte durch einen in den oben erwähnten hohlen Cylinder einzusteckenden Stift *d*, wenn dieser in die Furche eingriff, der Art festgestellt werden, dass er neben einer freiwilligen Auf- und Abbewegung eine zwangsweise Umdrehung durch das Zahnrad *R* erhielt.

Um nun Drähte von verschiedener Länge zu untersuchen, war ein langer Eisenstab *h* angefertigt worden, der bei *e* mit einer verticalen ebenen Fläche endete, gegen welche ein gehärtetes Eisenplättchen mittelst einer Schraube angedrückt werden konnte. Auf den beiden sich berührenden Flächen befand sich je eine verticale Furche, welche auf einander passten und in welche der zu untersuchende Draht eingeklemmt wurde.

Dieser Eisenstab konnte nun durch die Oeffnung von *A* und *B* hindurchgesteckt und mittelst Schrauben in einer solchen Lage festgeklemmt werden, dass das Ende bei *e* desselben in eine Entfernung von 12,5; 25; 50 Ctm. über *F* gelangte; ausserdem liess sich durch die Stellschrauben an *B* die Einklemmfurche der Klemme *c* genau senkrecht über die von *F* stellen. Bei Versuchen mit 1 Meter langen Drähten wurde statt der Stange *h* ein kleiner, oben knopfförmig verbreiteter eiserner Cylinder verwandt, welcher mit einer eben solchen Klemmvorrichtung wie der Stab *h* versehen war und dessen Einklemmfurche durch eine Schraube bei *a* ebenfalls genau senkrecht über die des unteren Cylinders gestellt werden konnte.

Die Versuche wurden nun in der Weise angestellt, dass die zu untersuchenden Drähte in dem Apparate bei *c* und *F* eingeklemmt, der Haken *H* mit einem Gewichte belastet und das Zahnrad in Rotation versetzt wurde, so dass also die Drähte tordirt wurden, indem sie gleichzeitig durch ein

Gewicht gespannt waren. Die Umdrehungen wurden so lange fortgesetzt, bis die Drähte entzwei rissen. Um eine gehörige Gleichmässigkeit herzustellen, wurde auf jede Umdrehung mit Hülfe einer Standuhr zwei Secunden verwandt, welche Zeit auch bei der Grösse und sonstigen Einrichtung des Apparates am geeignetsten war. Die Zahl der Umdrehungen, bei welcher der Draht entzwei riss, wurde notirt und in den weiter unten folgenden Tabellen die Mittel aus 10 solcher Versuche, sowie das Maximum und Minimum einer jeden Versuchsreihe zusammengestellt.

Die den Versuchen unterworfenen Drähte waren Stahldrähte, gezogene Eisendrähte, geglühte Eisendrähte und Kupferdrähte und zwar von jeder Art solche von drei verschiedenen Durchmessern. Die Stahldrähte waren aus Scheffield in England, die Eisendrähte aus Altena, die Kupferdrähte aus Iserlohn in Westfalen bezogen. Die Dicke der Drähte wurde mittelst eines Sphärometers bestimmt, indem an fünf verschiedenen Stellen des Drahtes je zwei auf einander senkrecht stehende Durchmesser gemessen und aus allen Werthen das Mittel genommen wurde.

Was die Stelle anlangt, an der die Drähte entzwei rissen, so ist zu bemerken, dass die dünnen Drähte meist an einer der Klemmen, die dickern aber an irgend welcher anderen Stelle, häufig auch gerade in der Mitte entzwei rissen.

Sämmtliche Zahlenresultate sind in den nun folgenden Tabellen zusammengestellt, deren Einrichtung so einfach und übersichtlich ist, dass hier nichts Weiteres hinzugefügt zu werden braucht.

Stahldraht Nr. I.

Dicke: 0,39 Mm. Absolute Festigkeit: 9,879 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	7,5 Kilo.			5 Kilo			2,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	1,32	1,6	1,0	2.67	3,0	2.2	4,71	5,4	4,0
25	2,42	3,1	2,0	4,89	5,9	4,3	8,65	9,7	7,0
50	4,54	5,7	3,5	8,61	10,9	7,6	15,16	16,9	13,5
100	8,49	10,9	6,9	15,93	19,3	13,1	26,21	29,7	22,3

Stahldraht Nr. II.

Dicke: 0,63 Mm. Absolute Festigkeit: 22,34 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	12,5 Kilo.			7,5 Kilo.			5 Kilo.		
	Mittel	Max.	Min.	Mittel	Max	Min.	Mittel	Max.	Min.
12,5	1,82	2,3	1,3	2,48	2,8	1,9	3,58	4,4	2,5
25	3,31	3,9	2,8	4,70	5,2	4,2	6,44	9,2	5,0
50	5,50	6,4	5,0	7,59	9,9	6,6	10,74	12,2	8,0
100	10,30	12,2	7,9	16,10	18,8	14,9	22,31	26,0	17,7

Stahldraht Nr. III.

Dicke: 0,88 Mm. Absolute Festigkeit: 51,1 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	25 Kilo.			12,5 Kilo.			7,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel	Max.	Min	Mittel.	Max.	Min
12,5	2,69	3,3	2,0	5,26	6,2	3,3	8,89	12,4	6,1
25	4.99	6,1	4.2	8.73	11,2	5,3	15,45	20,8	10.0
50	8,61	11,1	7,2	17.37	23,5	14,6	27,27	32,0	20,6
100	17,39	21,0	14,0	26,44	33,3	15,0	41,09	54.0	22,0

Ungeglühter Eisendraht Nr. I.

Dicke: 0,41 Mm. Absolute Festigkeit: 9,526 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	7,5 Kilo.			5 Kilo.			3,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	1,17	1,4	0,9	2,29	3,2	1,5	13,6	23,2	2,5
25	2,20	2,8	1.8	3,98	4,8	2,4	9,81	15,2	6,2
50	3,84	4,2	2,5	7,34	8,6	6,5	17,89	29,2	11,0
100	7,49	8,4	6,4	16,56	34,0	11,2	30,43	49,0	22,0

Ungeglühter Eisendraht Nr. II.

Dicke: 0,63 Mm. Absolute Festigkeit: 29,74 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	25 Kilo.			17,5 Kilo.			12,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	0,76	0,9	0,7	15,52	26,3	2,6	32,1	38,0	26,9
25	1,33	1,6	1,1	18,93	41,4	4,0	48,7	63,2	32,3
50	2,27	2,9	1,8	45,7	87,7	8,4	88,7	120,0	46,0
100	4,28	5,6	2,9	43,4	82,0	17,5	168,7	220,0	127,0

Ungeglühter Eisendraht Nr. III.

Dicke: 0,89 Mm. Absolute Festigkeit: 46,391 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	25 Kilo.			17,5 Kilo.			12,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	1,26	1,9	1,0	3,91	9,3	2,0	26,1	31,7	12,0
25	2,17	4,2	1,6	6,32	29,4	1,6	26,29	48,0	4,2
50	3,30	5,0	2,4	10,63	45,6	4,0	66,42	96,3	24,4
100	5,30	6,3	3,6	34,26	41,0	28,2	105,4	155,0	22,0

Geglühter Eisendraht Nr. I.

Dicke: 0,42 Mm. Absolute Festigkeit: 5,972 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	5 Kilo.			3,5 Kilo.			2,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	33,49	36,4	29,0	55,81	68,6	49,1	70.6	80.0	59.7
23	56.0	62.0	50.0	82.17	109.0	67.7	95.7	113.0	60.0
40	69,57	82,0	52,0	124.3	144.3	115.6	157.8	204.7	137.2

Geglühter Eisendraht Nr. II.

Dicke: 0,62 Mm. Absolute Festigkeit: 14,57 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	12,5 Kilo.			7,5 Kilo.			5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	15,03	16,5	13,1	58,9	63,0	55,4	67,16	82,9	59,3
23	25.68	31.3	21.4	91.42	99.4	83.9	123.51	144.0	112.2
40	43,09	55.6	31,7	141.02	176.1	78.6	191.04	229.9	162.6

Geglühter Eisendraht Nr. III.

Dicke: 0,89 Mm. Absolute Festigkeit: 26,625 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	25 Kilo.			17,5 Kilo.			12,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
11,5	2,47	4,9	0,7	24,67	28,8	21,1	37,46	40,1	33,6
20	3,10	3,7	1,4	34,64	44,1	28,0	52,52	65,7	39,6
40	4,36	6,0	2,6	61,87	74,0	48,2	85,47	110,0	67,5

Anmerkung. Wegen der bedeutenden Verlängerung, welche bei diesen Drähten eintritt, mussten solche von etwas geringerer Länge als bei den anderen Arten zu den Versuchen verwandt werden.

Kupferdraht Nr. I.

Dicke: 0,37 Mm. Absolute Festigkeit: 6,09 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	5 Kilo.			3,5 Kilo.			2,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	2,1	2,8	1,6	8,0	10,1	6,9	25,4	36,1	19,4
25	2,6	3,8	1,8	11,5	13,3	10,1	39,8	58,0	27,0
50	3,7	4,9	2,2	20,3	23,0	17,7	56,5	70,0	46,2
100	7,0	9,6	4,2	33,9	42,0	28,3	109,0	118,6	93,0

Kupferdraht Nr. II.

Dicke: 0,60 Mm. Absolute Festigkeit: 14,57 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	12,5 Kilo.			7,5 Kilo.			5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	1,4	2,1	1,1	21,2	37,0	12,4	50,7	60,0	43,2
25	2,0	2,7	1,8	19,0	30,0	13,3	63,8	75,0	52,7
50	3,4	3,8	2,9	36,6	53,4	5,4	115,5	137,0	101,0
100	6,0	7,9	5,2	48,7	55,0	32,0	156,7	176,0	138,0

Kupferdraht Nr. III.

Dicke: 0,82 Mm. Absolute Festigkeit: 26,42 Kilo.

Länge in Centimeter.	Zahl der Torsionen bei der Belastung von								
	25 Kilo.			12,5 Kilo.			7,5 Kilo.		
	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.	Mittel.	Max.	Min.
12,5	0,33	0,7	0,2	35,3	46,1	17,6	54,7	58,3	46,5
25	0,7	0,9	0,6	51,1	63,4	36,8	94,5	104,2	80,1
50	1,2	2,1	0,9	76,7	100,0	41,0	144,7	172,0	120,0

Resultate.

Aus diesen Tabellen ergeben sich hinsichtlich der pag. 11 angeführten Gesichtspunkte folgende Resultate:

a. Einfluss der Spannung während der Torsion.

Der Stahldraht I. hat eine absolute Festigkeit von 9,5 Kilo, d. h. er würde bei einer Belastung von 9,5 Kilo entzwei reissen; um dies bei einer Belastung von 7,5 Kilo zu bewirken, müssen noch 1,3 Torsionen angebracht werden; folglich ist hier und zwar bei einer Länge von 12,5 Cm. die Wirkung von 1,3 Torsionen gleich einem Zuge von 2,3 Kilo. Bei einer Belastung von 5 und 2,5 Kilo ergeben sich aus derselben Tabelle die Wirkung von

2,6 Torsionen gleich einem Zug von 4,8 Kilo.
4,7 „ „ „ „ „ 7,4 „

Man erhält aber aus diesen drei Werthen nahezu für eine Torsion dieselbe Zahl, nämlich:

1 Torsion aequivalent einem Zug von 1,8 Kilo.

Es lässt sich dies Gesetz auch so ausdrücken.

Bei Stahldrähten (von derselben Länge) ist die Zahl der Torsionen, welche Zerreissen bewirkt, nahezu direct proportional der Differenz aus der absoluten Festigkeit und der Belastung, bei welcher während der Rotation der Draht reisst.

Nahezu findet sich dasselbe Gesetz auch bestätigt bei dem Stahldrahte Nr. II. Es ergibt sich hier bei einer Belastung von:

12,5 Kilo die Zahl von 1,8 Tors. und äquival. = 10 Kilo.
7,5 „ „ „ „ 2,5 „ „ „ = 14,8 „
5 „ „ „ „ 3,6 „ „ „ = 17,3 „

also im ersten Falle ein Zug von 5,4; im zweiten von 5,9; im dritten von 5,0 als gleichwerthig mit einer Torsion.

Bei dem Stahldrahte Nr. III. hingegen erhält man je nach der Belastung:

2,7 Tors. = 26 Kilo, 1 Tors. = einem Zug von 9,7 Kilo
5,3 Tors. = 38,6 „ 1 „ = „ „ „ 7,3 „
8,9 Tors. = 43,6 „ 1 „ = „ „ „ 4,9 „

Das oben ausgesprochene Gesetz zeigt sich also hier nicht mehr bestätigt, die Werthe für eine Torsion werden um so kleiner, je weniger die Belastung betrug, bei der der Draht tordirt wurde. Es liess sich aber auch schon von vornherein erwarten, dass das obige Gesetz nur innerhalb gewisser Grenzen gelten könne, nämlich für den Fall, dass die Belastung, bei welcher der Draht tordirt wird, weder zu nahe an der absoluten Festigkeit, noch auch allzuweit davon entfernt sei, da man namentlich im letzteren Falle oft fast ins Unbestimmte hinein Torsionen anbringen kann, ohne dass der Draht entzwei reisst. Es betrug z. B. bei den Stahldrähten Nr. I. und II. das spannende Gewicht immer mehr als $^1/_4$ der absoluten Festigkeit, während bei Nr. III. 12,5 und 7,5 Kilo weniger als $^1/_4$ der absoluten Festigkeit ausmachen.

Welches nun nach beiden Seiten die Grenzen sind, konnte durch unsere Versuche, bei denen nur drei verschiedene Dicken desselben Drahtes zur Verwendung kamen, nicht festgestellt werden, jedenfalls aber ist das Gesetz folgendermassen auszusprechen:

„Wenn Stahldrähte von derselben Länge bei verschiedener Belastung tordirt werden, so ist die Zahl der Torsionen, welche Zerreissen bewirkt, annähernd direct proportional der Differenz aus der absoluten Festigkeit und der Belastung“ oder: Man erhält für denselben Draht bei Anwendung verschiedener Belastung für eine Torsion als Aequivalent eine constante Zahl von Kilo, vorausgesetzt, dass die Belastungen sich innerhalb gewisser Grenzen bewegen, die festzustellen bis jetzt noch nicht gelungen ist.

Um nun zu erkennen, ob und inwieweit dies für Stahldrähte bemerkenswerthe Gesetz auch für einen der übrigen Drähte Geltung habe, diene folgende Zusammenstellung:

	Zahl der Torsionen.			Diff. der absol. Festigkeit und Belastung.			Acquivalent für 1 Torsion.		
	I.	II.	III.	I.	II.	III.	I.	II.	III.
Geglühter Eisendraht	33	15	2,4	0,9	2,0	1,6	0,03	0,13	0,6
	55	59	24,6	2,4	7,0	11,1	0,04	0,12	0,4
	70	67	37,4	3,4	9,5	14,1	0,04	0,14	0,4
Kupferdraht	2,1	1,4	0,3	1,0	2,0	1,4	0,5	1,4	4,2
	8,0	21,2	35,3	2,6	7,0	13,9	0,3	0,3	0,3
	25	50,7	54,7	3,6	9,5	18,9	0,14	0,1	0,3
Ungeglühter Eisendraht	1,1	0,7	1,2	2	1,7	21,3	1,7	6,2	1,6
	2,2	15,5	3,9	4,5	12,2	28,8	1,5	0,7	7,3
	13,6	32,1	26,1	6,0	17,2	33,8	0,4	0,5	1,2

Anmerkung. Die Zahlen der 3 letzten Verticalreihen sind auf 2 Decimalen abgerundet.

Annähernd bestätigt, zeigt sich hiernach dies Gesetz auch für die geglühten Eisendrähte und ergibt sich als acquivalent für eine Torsion bei dem ersten 0,03 bis 0,04; bei dem zweiten 0,12 bis 0,14; bei dem dritten 0,4 bis 0,6.

Die Kupferdrähte aber und ungeglühten Eisendrähte lassen nur theilweise eine gewisse Gesetzmässigkeit in der fraglichen Beziehung erkennen. Dass bei Kupferdraht Nr. III. das einmal als acquivalent 4,2 gegen die beiden anderen 0,3 gefunden wurde, erklärt sich jedenfalls daraus, dass auch hier die Belastung 25 Kilo sehr nahe an der absoluten Festigkeit 26,4 lag und für diesen Fall das Gesetz keine Gültigkeit mehr haben wird. Im Uebrigen muss hier darauf hingewiesen werden, dass die ungeglühten Eisen- und Kupferdrähte bei weitem nicht so homogen und gleichmässig in der Structur sind, als die Stahl- und geglühten Eisendrähte. Es erhellt dies aus den in den Tabellen niedergelegten Beobachtungszahlen. Die Maxima und Minima der beiden letzteren differiren verhältnissmässig wenig, während die der beiden ersteren oft sehr bedeutend von einander abweichen.

Dieser grösseren Unregelmässigkeit des ganzen Gefüges glauben wir es allein zuschreiben zu müssen, dass die ungeglühten Eisen- und Kupferdrähte weniger übereinstimmende Resultate lieferten als die beiden anderen.

b. Beziehung der Torsionszahl zur absoluten Festigkeit.

Zur besseren Uebersicht des Zusammenhanges zwischen der Zahl der Torsionen, welche Zerreissen bewirkt und der absoluten Festigkeit ist aus den Tabellen zunächst für die drei dünneren Drähte folgende Zusammenstellung vorgenommen.

	Dicke.	Absolute Festigkeit.	Tors.Zahl bei 2,5 Kilo.	Absol. Werth für 1 Torsion.
Stahldraht	0,39	9,87	4,7	1,8
Kupferdraht Nr. I. . .	0,37	6,09	25,4	0,1—0,5
Gegl. Eisendraht Nr. I.	0,42	5,9	70,6	0,04

wobei die Zahlen der letzten Reihe auf Seite 18 und 20 zu finden sind.

Es ergibt sich hieraus:

Für verschiedene Drahtsorten ist die Torsionszahl nicht proportional der absoluten Festigkeit.

Die weicheren Kupfer- und geglühten Eisendrähte lassen, obwohl von geringerer absoluter Festigkeit bei gleicher Belastung eine viel grössere Anzahl von Torsionen zu, d. h. bei ihnen ist der absolute Werth für eine Torsion viel geringer als bei den Stahl- und gezogenen Eisendrähten von derselben Dicke. Selbstverständlich gilt auch hierbei ebenso wie vorher die Beschränkung, dass nicht etwa bei dem einen oder anderen der verglichenen Drähte die Belastung allzu nahe an der absoluten Festigkeit liegt.

c. Die Torsionszahl in Bezug auf die Länge des Drahtes.

Die für die Stahldrähte aufgestellten Tabellen lassen deutlich das Gesetz erkennen:

Die Zahl der Torsionen, welche Zerreissen bewirkt, ist annähernd direct proportional der

Länge des Drahtes oder: Der absolute Werth für eine Torsion ist indirect proportional der Länge.

Freilich findet sich dies Gesetz nicht durchweg bestätigt, bei grossen Längen und geringer Belastung haben sich etwas zu kleine Zahlen ergeben, namentlich gilt dies von den Stahldrähten Nr. II. und III. Nahezu findet das Gesetz auch Anwendung bei dem gezogenen Eisendraht Nr. I.; aber in weit geringerem Masse bei den beiden anderen Eisendrähten. Diese sind ja, wie schon oben bemerkt, weniger homogen und gleichmässig als die Stahldrähte und ist also bei ihnen kaum irgend welche Gesetzmässigkeit zu erwarten. Das vorstehende Gesetz gilt aber gar nicht mehr für die weicheren, geglühten Eisendrähte und Kupferdrähte.

Bei den weicheren Drähten wächst die Zahl der Torsionen, welche Zerreissen bewirkt, mit der Länge; aber nicht in directem Verhältnisse mit derselben sondern so, dass man für die doppelte Länge des Drahtes eine Torsionszahl erhält, welche weniger als das Doppelte der zur einfachen Länge gehörigen Zahl beträgt.

Es hat dies offenbar seinen Grund in einer Erscheinung, welche weiter unten erwähnt werden soll, nämlich in einer bedeutenden Verlängerung, welche diese Drähte während der Torsion erleiden, in Folge deren der Querschnitt des Drahtes eine bedeutende Verkleinerung erfährt.

In Bezug auf den Zusammenhang der

d. Torsionszahl und Dicke

bei demselben Drahte diene folgende Zusammenstellung:

	Dicke.	Werth für 1 Torsion.
Stahldraht	0,39	1,8
	0,63	5,4
	0,88	6,7
geglühter Eisendraht	0,42	0,04
	0,62	0,13
	0,89	0,5

Wir gehen nunmehr zu der Besprechung der pag. 11 erwähnten, bei den Versuchen auftretenden Erscheinungen über.

a. Schraubenwindungen auf der Oberfläche, Verlängerungen und Verkürzungen.

Denkt man sich die Drähte aus Theilchen bestehend, welche nach geraden Linien geordnet sind, so wird bei der Torsion eine jede Gerade in eine Schraubenlinie verwandelt, es muss also eine Verkürzung eintreten, indem bei fortgesetzter Torsion die Schraubenwindungen immer näher an einander rücken, vorausgesetzt, dass die Cohäsion des Drahtes dem durch die Belastung ausgeübten Zuge den erforderlichen Widerstand entgegenzusetzen vermag. Die eben erwähnten Schraubenwindungen sind in der That bei tordirten Drähten auf der Oberfläche deutlich zu erkennen, doch sind dieselben nicht bei allen Drähten über die ganze Oberfläche gleichmässig verbreitet, an manchen Stellen scheinen sie zuweilen ganz zu fehlen. Bei mehreren tordirten Drähten wurden die Windungen gezählt und stimmte die Zahl derselben mit der der angebrachten Torsionen überein. Bezüglich der Höhe sind die Schraubengänge von einander verschieden; bei mehreren Drähten, z B. Kupferdraht Nr. III., welche bis zum Zerreissen tordirt waren, konnte beobachtet werden, dass auf beiden Stücken an der Bruchstelle die Höhe eines Schraubenganges viel geringer war, als an den Einklemmstellen. Die dünneren Stahldrähte zeigten auf ihrer Oberfläche nach der Torsion keine Windungen, jedoch liess sich unter der Loupe die Aenderung des Gefüges deutlich erkennen. Besonders deutlich aber waren diese Schraubenwindungen bei weichen Eisen- und Kupferdrähten wahrzunehmen. Es ist vorher bemerkt worden, dass unter gewissen Umständen bei der Torsion eine Verkürzung eintreten müsse. Dieselbe zeigte sich sehr auffallend bei Hanfseilen, welche während der Torsion mit 7,5 oder 10 Kilo belastet waren. Auch bei ungeglühten Eisen- und bei Stahldrähten findet

eine bedeutende Verkürzung statt. Die Kupferdrähte aber, so deutlich sie auch das schraubenförmige Gefüge nach der Torsion erkennen lassen, machen hiervon eine Ausnahme, bei ihnen ist gerade eine bedeutende Verlängerung wahrzunehmen. Der Kupferdraht Nr. III. z. B. 5 Cm. lang war mit 12,5 Kilo belastet und zeigte nach 70 Torsionen eine Verlängerung von über 2 Cm. Noch auffallender bieten diese Verlängerung die geglühten Eisendrähte dar. Es ist nicht die Absicht, hier genauer zu untersuchen, in welchem Zusammenhange die Verlängerung mit der Zahl der Torsionen steht, es mögen hier nur einige Zahlen mitgetheilt werden.

	Länge in Cm.	Belastung in Kilo.	Zahl der Torsion.	Verlängerung in Cm.
Geglühter Eisendraht Nr. I.	12,5	5	28	3
	23	5	50	5
	40	5	78	8
Geglühter Eisendraht Nr. II.	12,5	12,5	15	2,5
	23	12,5	26	5
	40	12,5	30	6,5
Geglühter Eisendraht Nr. III.	11,5	12,5	43	2,5
	20	12,5	60	3,5
	40	12,5	75	5,3

b. Knickungsfiguren.

Wenn die Drähte entzwei reissen, so nehmen sie in der Nähe der Stelle, an welcher sie befestigt waren, eine eigenthümliche mehr oder weniger gekrümmte oder eckige, bleibende Gestalt an. Diese Erscheinung tritt am ausgezeichnetsten bei dünnen Drähten auf, welche durch verhältnissmässig schwere Gewichte entzwei gerissen werden; erfolgt der Riss an der einen Einklemmstelle, so tritt die Biegung an dem anderen Ende des Drahtes auf; reisst der Draht in der Mitte, so sieht man an beiden Einklemmstellen gleich grosse Biegungen entstehen, welche jedoch kleiner sind als im vorigen Falle. Reisst der Draht an einer anderen Stelle als der Mitte, so ist die Einknickung stärker und deutlicher am Ende des grösseren als an dem des kleineren Stückes.

Bei dickeren Drähten, z. B. dem Stahldraht Nr. II. ist nach dem Zerreissen nur eine ganz schwache Einbiegung zu bemerken; der Stahldraht Nr. III. zeigt die Erscheinung gar nicht, wenn er in der Mitte entzwei reisst, wird er aber durch ein schweres Gewicht belastet und an der einen Einklemmstelle abgeschnitten, so nimmt der ganze Draht eine wellenförmige Gestalt an. Bei dünneren Drähten zeigt sich (Siehe *Fig. 2 a* u. *b*) an einer eckigen Einbiegung ein stark gewölbter kreisförmiger Bogen; bei dickeren aber z. B. dem Kupferdraht Nr. II. (*Fig. 2c*) ist die eckige Einbiegung viel stumpfer und der darauf folgende Theil des Drahtes nur ganz schwach gekrümmt.

Alle diese Biegungen, welche bei gewöhnlichen Drähten nach dem Zerreissen wahrzunehmen sind, treten auch auf, wenn die Drähte vorher tordirt waren; jedoch ist in dem letzteren Falle die Biegungsfigur eine doppelt gekrümmte (schraubenförmig gewundene) Curve.

Diese Knickungsfiguren hat schon Weber gelegentlich seiner Untersuchungen mit dem Monochord beobachtet (Siehe Pogg. Ann. XV. 1).

Um ihr Entstehen zu erklären, sagt er daselbst: „Offenbar ist unter den nach allen Richtungen in der Horizontal-Ebene vollkommen symetrischen Umständen und Verhältnissen, unter welchen die Saite reisst, kein anderer Grund zu einer solchen einseitigen Ausbeugung der Saite vorhanden, als dass die Saite an der Stelle, wo sie reisst, nicht im ganzen Querschnitt zugleich reisst, sondern dass die Theile der Saite an irgend einer Seite derselben sich von einander zu trennen anfangen und dass dies Losreissen der einzelnen Längsfasern sich allmälig bis auf die gegenüberliegende Seite des Umrings der Saite fortsetzt."

Nach meinen Erfahrungen zeigen sich aber diese eigenthümlichen Ausbiegungen auch dann, wenn der Draht nicht reisst, sondern aus der Klemme ausgleitet, so dass diese Thatsache der Werber'schen Erklärung gegenüber zu stehen scheint und die ganze Erscheinung den Eindruck macht, als

hätte man es hier mit einer momentanen Wellenbewegung zu thun, die im Momente des Reissens oder des Ausfahrens aus der Klemme den Draht durcheilt und an einer Stelle als Berg und Thal verkörpert wird, da im nächsten Momente die Bedingungen zur Weiterfortpflanzung durch den Wegfall der Spannung nicht mehr vorhanden sind.

Es wäre daher wünschenswerth, wenn diese interessante Erscheinung einer speciellen Untersuchung unterworfen würde, da die grosse Mannigfaltigkeit der Knickungsfiguren, die hierbei beobachtet werden, allein schon einen Gegenstand des Interesses abgibt.

Ueberhaupt haben wir aus dem von uns vollständig mitgetheilten, reichhaltigen Beobachtungsmaterial hier nur kurz diejenigen Folgerungen gezogen, die uns zunächst als am meisten bemerkenswerth erschienen und können uns denken, dass dasselbe bei einer näheren Betrachtung noch manche andere Gesetzmässigkeit erkennen lässt, namentlich dann, wenn man eine Reihe von graphischen Darstellungen entwerfen wollte.

Am Schlusse dieser Arbeit ist es mir eine angenehme Pflicht, Herrn Professor Melde zu Marburg, auf dessen Veranlassung und in dessen Laboratorium ich diese Untersuchung unternahm, für die gütige Unterstützung, die er mir bei der Ausführung derselben gewährte, hierdurch öffentlich meinen besten Dank auszusprechen.

Fig. 1

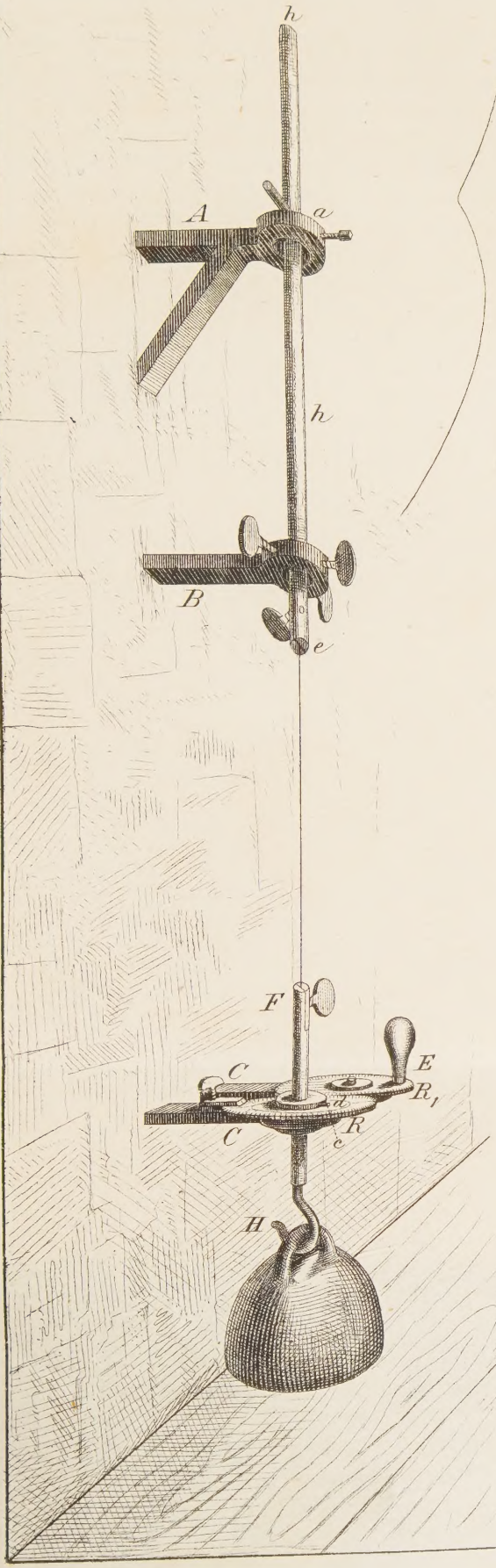

Fig. 2